УДК 621.039.633

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ПОТОКОВ В СИСТЕМАХ ИНЖЕКЦИИ ГИБРИДНОЙ УСТАНОВКИ ДЕМО-ТИН С УЧЁТОМ СОГЛАСОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСНОВНОЙ И ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЫ

С.С. Ананьев, А.Ю. Днестровский, А.С. Кукушкин, А.В. Спицын, Б.В. Кутеев

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия,

Для расчёта потоков изотопов водорода в топливных системах термоядерного источника нейтронов на основе токамака ДЕМО-ТИН с параметрами $R/a = 3,2$ м/1 м, $B = 5$ Тл, $I_p = 4\text{—}5$ МА, $P_{\text{NBI}} = 30$ МВт и $P_{\text{ECR}} = 6$ МВт и мощностью ДТ-синтеза $P_{\text{fus}} = 40$ МВт используется модель топливного цикла FC-FNS (Fuel Cycle for Fusion Neutron Source). Модель FC-FNS была значительно модернизирована. Впервые проведено совместное моделирование газовых, твердотельных и плазменных потоков топливных смесей в областях основной и диверторной плазмы при инжекции примеси неона в диверторы. Обоснована возможность снижения потоков водорода в системах откачки и инжекции при использовании примеси Ne в диверторе. Для принятых ранее к рассмотрению сценариев использования $D^0 + T^0$ - и D^0 -пучка дополнительного нагрева рассчитано накопление трития в ТЦ с учётом бридинга T и его выгорания при различном соотношении T/D (f_T) в плазме. Показано, что при использовании D + T-пучка целесообразно поддерживать $f_T = 0,5$, а при использовании D-пучка $f_T = 0,6\text{—}0,7$. Была принципиально пересмотрена инжекция топлива различными системами. Основным способом подпитки принята инжекция топливных пеллет, которая теперь представлена отдельными инжекторами D_2 , T_2 , DT и осуществляется как с внутренней, так и с наружной стороны тора. Проанализирована работа систем инжекции ТЦ ДЕМО-ТИН в зависимости от параметров основной плазмы и оценены газовые потоки при различных режимах инжекции $D_2/T_2/DT$ -пеллет. Полученные результаты позволили нам выбрать конфигурацию системы с минимальным запасом трития (<2 кг) и наименьшим временем переработки.

Ключевые слова: изотопы водорода, термоядерный топливный цикл, термоядерный реактор, D—T-моделирование, источник термоядерных нейтронов, гибридная установка, электронная модель, моделирование основной и диверторной плазмы.

SIMULATION OF FUEL FLOWS IN INJECTION SYSTEMS OF DEMO-FNS HYBRID FACILITY INVOLVING COUPLED MODELING OF THE CORE AND DIVERTOR PLASMAS

S.S. Ananyev, A.Yu. Dnestrovskij, A.S. Kukushkin, A.V. Spitsyn, B.V. Kuteev

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

The FC-FNS fuel cycle model is used to calculate the hydrogen isotope flows in the fuel systems of a tokamak-based fusion neutron source (DEMO-FNS) with parameters $R/a = 3.2$ m/1 m, $B = 5$ T, $I_p = 4\text{—}5$ MA, $P_{\text{NBI}} = 30$ MW, $P_{\text{ECR}} = 6$ MW and DT fusion power $P_{\text{fus}} = 40$ MW. The FC-FNS (Fuel Cycle for Fusion Neutron Source) model has been significantly upgraded. For the first time, a joint simulation of gas, solid-state, and plasma flows of fuel mixtures in the regions of core and divertor plasma with the injection of neon impurity into the divertors was carried out. The possibility of reducing the fuel fluxes in the pumping and injection systems with the use of Ne impurity in the divertor has been substantiated. For the previously accepted scenarios of the $D^0 + T^0$ - and D^0 -heating beam, the tritium inventories in the fuel systems was calculated taking into account the T breeding and burnout with a various T/D (f_T) ratio in core plasma. It was shown that for D + T-beam is advisable use $f_T = 0.5$ and for the D-beam is more expedient $f_T = 0.6\text{—}0.7$. The fuel injection was fundamentally revised. The main fueling method is fuel pellets injection, which is now represented by separate D_2 , T_2 , DT injectors and carried out from HFS and LFS. The DEMO-FNS injection system operation modes were analyzed in dependence on the core parameters and the gas flows were evaluated for various $D_2/T_2/DT$ pellet-injectors modes. The results obtained have allowed us to choose the fuel systems configuration with the minimum tritium inventory (<2 kg) and the lowest reprocessing time.

Key words: hydrogen isotopes, fusion fuel cycle, fusion-fission reactor, D—T simulation, fusion neutron source, hybrid facility, simulation model, core and divertor plasmas modelling.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-2-5-21

ВВЕДЕНИЕ

Проект создания источника термоядерных нейтронов ДЕМО-ТИН [1] на основе классического токамака с двухнулевым дивертором развивается в НИИЦ «Курчатовский институт» с 2013 г. В проекте предполагается стационарная работа термоядерного источника с ДТ-плазмой и системой воспроизводства трития в гибридном бланкете. Обеспечение плазмы изотопами для стационарного режима горения, удаление избытков частиц из области дивертора и переработка газовой смеси для её возврата в вакуумную камеру с минимальным накоплением изотопов в системах разделения и очистки являются важными задачами, которые решает топливный цикл (ТЦ) установки. Модель топливного цикла FC-FNS [2] развивается с начала проекта ДЕМО-ТИН и учитывает актуальные инженерные и концептуальные изменения в проекте.

Рис. 1. Схема топливного цикла ДЕМО-ТИН в модели FC-FNS

Схематично ТЦ ДЕМО-ТИН показан на рис. 1. Системы ТЦ обеспечивают откачку газа из диверторов установки, предварительную очистку и отделение примесных газов от изотопов водорода, последующую очистку изотопов водорода, хранение запасов изотопов и ввод топлива в плазму для поддержания условий горения, нагрева и создания тока в плазме системой нейтральной инжекции (СНИ или NBI). Для обеспечения плазмы топливом, помимо инжекции частиц в виде пучка (анализируются сценарии с $D^0 + T^0$ - и D^0 -пучком), используется система инжекции пеллет (СИП или PIS) со стороны сильного и слабого магнитного поля. Система газовых клапанов (СГК или GIS), помимо инжекции газовой смеси изотопов водорода, обеспечивает ввод примесей. Поскольку топливные потоки в вакуумной камере охватывают как центральную, так и пристеночную плазму, важно проводить совместное моделирование газовых и плазменных потоков в этих областях.

АРХИТЕКТУРА ТЦ В МОДЕЛИ FC-FNS И АЛГОРИТМ РАСЧЁТОВ

В модели FC-FNS рассматриваются элементы ТЦ (рис. 2), которые предусматриваются текущим состоянием проекта ДЕМО-ТИН. Расчёты потоков и накопления запасов газов производятся для элемен-

Рис. 2. Схема топливного цикла ДЕМО-ТИН в модели FC-FNS. Стрелками на рисунке обозначены потоки T и T_2 (—), — — — T и T_2 (для случая $D^0 + T^0$ -пучка), — — — D и D_2 , — — — DT , и - - - примесей, вводимых для усиления излучения из плазмы. Выделены системы нейтральной инжекции (СНИ), ввода газа (СГК), инжекции пеллет (СИП), разделения изотопов (СРИ), восстановления изотопного состава (СВИС) и системы примесной инжекции и обработки вспомогательных газов (ОВГ)

тов, содержащих изотопы водорода. На рис. 2 приведена блок-схема ТЦ. Потоки различных фракций топлива на рисунке показаны стрелками различной толщины. Условно показаны системы инжекции примесных газов. Долговременное хранилище используется для сбора наработанного в бланкете трития. Геттерные хранилища для D_2 и T_2 содержат газ для обеспечения бесперебойной работы всех систем ТЦ, в том числе при остановке тритийвоспроизводящих систем. Фракция DT обозначена отдельно от других в тех системах, где это важно.

Согласно проекту ДЕМО-ТИН включает системы дополнительного нагрева плазмы. Наиболее эффективен способ нагрева плазмы и генерации тока пучком нейтральных атомов. Для обеспечения стационарного режима инжекции предполагается использовать шесть нагревных инжекторов в составе системы нейтральной инжекции [3]. Концепция системы пучкового нагрева плазмы и генерации тока подразумевает использование пучка, содержащего нейтральные атомы одного типа дейтерия (D^0) либо смеси дейтерия и трития ($D^0 + T^0$). При этом каждый вариант имеет свои преимущества и недостатки [3—5]. СНИ входит в число основных систем ТЦ и включает в себя инжекторы, соединённые с вакуумной камерой установки и требующие газоснабжения для своей работы. Поток частиц D и T из вакуумной камеры в инжекторы будет приводить к накоплению изотопов (прежде всего трития) в системе газоснабжения СНИ, что необходимо учитывать [3, 4]. Модель FC-FNS позволяет рассчитывать сценарии $D^0 + T^0$ - и D^0 -пучка, в связи с этим структура ТЦ обеспечивает работу систем для обоих случаев. Для случая пучка $D^0 + T^0$ потоки D_2 и T_2 с криопанелей инжекторов СНИ будут направляться в систему очистки топлива, минуя систему откачки вакуумной камеры. Эти потоки обозначены пунктирными линиями на рис. 2.

В качестве основного источника топлива, помимо инжекции частиц в виде пучка, нами рассматривается инжекция пеллет со стороны сильного и слабого поля. Изменяя размер пеллет и частоту инжекции с различных направлений, мы можем эффективно решать задачу борьбы с ЭЛМ [6, 7]. Расчёты [8] показывают, что для инжекции потребуются высокая начальная скорость и, следовательно, механическая прочность пеллет. Для повышения прочности пеллет мы предполагаем аналогично ИТЭР их раздельное изготовление из D_2 , T_2 и DT с последующим введением разными инжекторами. Для обеспечения разделения топливного потока на требуемые фракции в составе ТЦ предусмотрена система разделения (СПИ или ISS), которая перерабатывает необходимое для СИП количество газовой смеси. Остальной поток из системы откачки и очистки поступает в систему восстановления изотопного состава (СВИС или IRS) для последующего дообогащения (компенсации потерь в ТЦ) и инжекции с помощью газовых клапанов.

СТРУКТУРА МОДЕЛИ И АЛГОРИТМ РАСЧЁТОВ С УЧЁТОМ СОВМЕСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОСНОВНОЙ И ДИВЕРТОРНОЙ ПЛАЗМЫ

Модель FC-FNS состоит из трёх связанных вычислительных блоков. В блоке 1 рассчитывается стационарный баланс частиц D и T в системах ТЦ, внешних по отношению к плазме, при заданных потоках в плазму. Баланс описывается системой алгебраических уравнений для каждой системы ТЦ. Система уравнений для каждого сорта частиц в каждой системе k имеет вид

$$\sum_i \Phi_{ik} = 0, \quad (1)$$

где Φ_{ik} — поток частиц данного сорта из системы i в систему k , $\Phi_{ki} = -\Phi_{ik}$.

В блоке 2 рассчитанные потоки D и T через системы ТЦ служат для расчёта содержания изотопов в системах и ТЦ в целом. Для этого моделируются геометрические характеристики систем и их физические параметры (в том числе режимы работы, производительности). В блоке 3 проводятся итерации с блоком 1 для установления баланса потоков в плазме. Рассматриваются откачка из дивертора, обработка газа и ввод системами инжекции, работающими в заданном режиме.

Во всех системах ТЦ рассматривается смесь D:T(:H) с переменным соотношением фракций D_2 , T_2 и DT. Фракции H_2 , HT и HD мы рассчитываем не во всех системах, однако оцениваем суммарное количество протия и делаем оценку доли протия в ТЦ и плазме [5]. Значение $f_T(k) = N_T/(N_T + N_D)$ в каждой системе (k) ТЦ (здесь N_T и N_D — количество T и D в данной системе) будет индивидуальным и может изменяться на каждом шаге расчёта. Далее рассмотрим подробно структуру блоков модели FC-FNS и алгоритмы расчётов.

БЛОК 1. СТАЦИОНАРНЫЙ БАЛАНС ЧАСТИЦ D И T В СИСТЕМАХ ТЦ

Расчёт стационарного баланса частиц D и T производится последовательно во всех системах ТЦ, исключая плазму. Структура ТЦ с обозначением всех рассматриваемых систем приведена на рис. 2. Расчёт баланса частиц осуществляется на основании потока частиц в откачку из основной плазмы, а также потоков частиц через вакуумную камеру, обеспечиваемых системами инжекции. В совместном моделировании центральной и диверторной плазмы [9] баланс основных ионов (дейтерия и трития) в плазме описывается уравнениями диффузии с источниками от ионизации нейтралов, поступающих через сепаратрису $S_{0, \text{sep}}$, от пучка S_{NB} и от внешнего источника топливных пеллет S_{pel} :

$$S_{\text{sep}} = S_{0, \text{sep}} + S_{\text{NB}} + S_{\text{pel}} - S_{\text{fus}}, \quad (2)$$

где S_{fus} — поток частиц, сгорающих при синтезе; S_{sep} — уход ионов из основной плазмы через сепаратрису. При этом в предположении 100%-ного рециклинга на стенке и диверторных пластинах баланс частиц каждого изотопа водорода в пристеночной плазме записывается в виде

$$S_{\text{pump}} = S_{\text{puff}} + S_{\text{sep}} - S_{0, \text{sep}} - S_{0, \text{NB}} - S_{0, \text{Li}} - S_{0, \text{coolant}}, \quad (3)$$

где S_{pump} — поток частиц в систему откачки; S_{puff} — внешний источник газа (в том числе примесного). Также мы учитываем потери частиц в патрубки нейтральной инжекции $S_{0, \text{NB}}$, захват газа парами лития $S_{0, \text{Li}}$, диффузию изотопов водорода в хладагент (первой стенки и дивертора) $S_{0, \text{coolant}}$. В свою очередь

$$S_{\text{pump}} = c_p p_n, \quad (4)$$

где c_p — скорость откачки (её зависимость от массы молекул изотопа пренебрегаем); p_n — приведённое давление нейтралов в диверторе, которое суммарно определяет режим работы дивертора [10]. Мы считаем время удержания частиц в основной плазме одинаковым для всех источников в (2).

Вычисление потоков через системы ТЦ начинается с оценки потока частиц из основной плазмы и формирования требований к системам инжекции для компенсации этого потока и поддержания стабильного термоядерного горения плазмы. Скейлинги [9] описывают взаимосвязь между потоками энергии и частиц, выходящими из основной плазмы и попадающими в диверторную плазму, и параметрами плазмы на сепаратресе, а также пределы вариации p_n для обеспечения режима удержания без полной отслойки, но с приемлемыми тепловыми нагрузками [9]. Потоки частиц T и D из основной плазмы описываются уравнениями (5)—(7), в которых используются согласованные параметры основной плазмы, такие как средняя плотность $\langle n_e \rangle$, средняя концентрация неона на сепаратресе f_{Ne} , $Z_{\text{эф}}$, мощность, выносимая плазмой через сепаратрису, P_{SOL} , время удержания энергии τ_E и частиц τ_p в основной плазме [9]:

$$S_{\text{fus T, D}} = P_{\text{fus}} 10^6 / (17,589 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}) \quad (5)$$

для частиц трития и дейтерия,

$$S_{0, \text{sep T}} = 9,0 \mu^{0,256} P_{\text{SOL}}^{-0,046} f_{\text{Ne}}^{-0,22} 10^{20} f_T;$$

для частиц трития и

$$S_{0, \text{sep D}} = 9,09 \mu^{0,256} P_{\text{SOL}}^{-0,046} f_{\text{Ne}}^{-0,22} 10^{20} (1 - f_T) \quad (6)$$

для дейтерия, где $\mu = 1,37 p_n^{1,102} P_{\text{SOL}}^{0,032} f_{\text{Ne}}^{0,474}$,

$$S_{\text{sep T, D}} = N_{\text{T, D}} / (\tau_E \tau_p / \tau_E 10^{-3}) \quad (7)$$

для частиц трития и дейтерия, где f_T — доля трития, а количество частиц T и D в основной плазме

$$N_{\text{T}} = V_{\text{core}}(n_{\text{T}} + n_{\text{D}}) f_T \quad (8)$$

для трития и

$$N_{\text{D}} = V_{\text{core}}(n_{\text{T}} + n_{\text{D}})(1 - f_T)$$

для дейтерия, при этом $n_{\text{T}} + n_{\text{D}} = \langle n_e \rangle (1 - (Z_{\text{эф}} - 1) / (Z_{\text{Ne}} - 1))$.

Согласно (2) и (5)—(7) можно оценить потоки $S_{\text{NB}} + S_{\text{pel}}$, которые должны быть обеспечены системами инжекции для поддержания выбранных параметров плазмы:

$$S_{\text{NB}} + S_{\text{pel T, D}} = S_{\text{fus T, D}} + S_{\text{sep T, D}} - S_{0, \text{sep T, D}} \quad (9)$$

для частиц трития и дейтерия.

Однако потоки, рассчитанные для системы инжекции из баланса частиц в системах ТЦ, могут отличаться от желаемых, что может привести к рассогласованию в (1). Это мы рассмотрим далее при описании блока 3.

Эффективность ввода топливных частиц в основную плазму составляет <100%. Часть нейтралов, подаваемых в камеру системами СНИ и СИП, ионизуется в пристеночной плазме, в результате чего формируются дополнительные потоки частиц в дивертор. Фактические потоки частиц каждого рода из систем инжекции записываются как $S_{NB} + S_{puff}(NB)$ для пучка (NB) и $S_{pel} + S_{puff}(pel)$ для пеллет (pel), где $S_{puff}(NB, pel)$ — источник частиц из соответствующей системы ТЦ, которые не проходят через пристеночную плазму и попадают в дивертор, участвуя в формировании там давления газа. В результате неэффективного ввода частиц в центральную плазму и дополнительного напуска газа для поддержания p_n , т.е. режима работы дивертора, проток частиц через вакуумную камеру превышает поток частиц, необходимый для стабильного термоядерного горения плазмы и формирования условий её удержания:

$$\langle n \rangle V_p / \tau_p = S_{sep}. \quad (10)$$

При этом в уравнении (3)

$$S_{puff} = S_{puff}(NB) + S_{puff}(pel) + S_{GIS} \quad (11)$$

для каждого изотопа топливной смеси. Здесь S_{GIS} — поток частиц через газовые клапаны. Мы подбираем величину S_{GIS} так, чтобы обеспечить желаемый режим работы дивертора. Необходимое давление p_n в диверторе достигается за счёт согласованной откачки S_{pump} (3) и инжекции $S_{puff} + S_{NB} + S_{pel}$, тогда

$$S_{GIS} = c_p p_n - (S_{puff}(NB) + S_{puff}(pel)) - S_{sep} + S_{0, sep}. \quad (12)$$

В результате параметры инжекции S_{NB} и S_{pel} являются свободными, а S_{GIS} рассчитывается, исходя из значения p_n .

Для заданных параметров инжекции и уравнений (11), (12) рассчитываются потоки частиц различного типа, формируемые инжекционными системами и подпитывающие центральную и пристеночную плазму: $S_{NB} + S_{puff}(NB)$, $S_{pel} + S_{puff}(pel)$ и S_{GIS} . Параметры инжекции должны подбираться таким образом, чтобы обеспечивать наибольшее соответствие с (9). При удовлетворении потребности плазмы в частицах обоих типов рассчитываются потоки, создаваемые в системе откачки (3). Помимо откачки газа из дивертора, мы рассматриваем ещё несколько механизмов уменьшения количества частиц в вакуумной камере — диффузии в конструкционные элементы и хладагент, а также захват изотопов жидким металлом (литием), наличие которого предполагается проектом ДЕМО-FNS. Очевидно, что эти потоки значительно меньше, чем в систему откачки. В блоке 2 производится оценка этих потоков на основании конструкционных параметров, после чего значения используются в блоке 1 для учёта всех частиц и замыкания баланса (1).

Из уравнений (3), (4) видно, что S_{pump} зависит от скорости откачки, которая является инженерным параметром, и от параметров плазмы — потоков $S_{sep} - S_{0, sep}$. Таким образом можно оценить минимальное значение $c_p(0)$, обеспечивающее равновесное состояние плазмы и давление p_n (в предположении $S_{puff} = 0$). В действительности фактором, ограничивающим c_p снизу, может оказаться откачка гелия [11, 12]: чем ниже c_p , тем выше равновесная концентрация гелия в плазме.

Как уже ранее отмечалось, расчёты баланса частиц D и T проводятся в модели FC-FNS для различных типов используемого нейтрального пучка. Нами рассмотрена подача смеси D + T в источник и в нейтрализатор инжекторов СНИ для режима $D^0 + T^0$ и чистого дейтерия для случая D^0 с учётом накопления в газовой смеси примеси трития $T_{2 adm}$. В связи с тем, что архитектура ТЦ будет иметь отличия для этих случаев, значения потоков в одних и тех же системах рассчитываются по-разному для сценариев $D^0 + T^0$ - и D^0 -пучка. Так, в систему очистки будут поступать различные потоки D и T с криопанелей СНИ в зависимости от выбранной схемы газоснабжения СНИ ($D_2 + T_2$, D_2 , $D_2 + T_{2 adm}$):

$$S_{NBI, cp T}(D_2 + T_2) = (1 - f_T)(S_{is} + S_{neut})N_{NBI} + S_{0, NB T}N_{NBI} - (S_{NB T} + S_{puff}(NB) T)$$

для частиц трития и схемы газоснабжения СНИ $D_2 + T_2$ для дейтерия соответственно,

$$S_{NBI, cp D}(D_2 + T_2) = f_T(S_{is} + S_{neut})N_{NBI} + S_{0, NB D}N_{NBI} - S_{NB D} + S_{puff}(NB) D; \quad (13)$$

$$S_{NBI, cp T}(D_2) = S_{0, NB T}N_{NBI}$$

для частиц трития и схемы газоснабжения СНИ D_2 (мы учитываем частицы T, прилетевшие из вакуумной камеры по атомпроводам нейтральной инжекции) для дейтерия соответственно,

$$S_{\text{NBI, cp D}}(D_2) = S_{0, \text{NB D}} N_{\text{NBI}} + (S_{\text{NB D}} + S_{\text{puff}}(\text{NB})_D)(1 - F_{\text{CX}}(E_{\text{NBI}}))/F_{\text{CX}}(E_{\text{NBI}}). \quad (14)$$

Для схемы газоснабжения СНИ $D_2 + T_{2 \text{ adm}}$ мы считаем цикл замкнутым (в результате отепления криопанелей инжекторов газ не будет поступать в основной ТЦ). Количество трития в газовой смеси будет возрастать за счёт потока из вакуумной камеры (при каждой регенерации криопанелей инжекторов), и его необходимо возвращать в основной ТЦ в системе детритизации для предотвращения накопления (в стационаре считаем скорость выделения равной скорости поступления):

$$S_{\text{NBI, cp T}}(D_2 + T_{2 \text{ adm}}) = S_{0, \text{NB T}} N_{\text{NBI}},$$

однако поступления дейтерия в основной ТЦ схемы газоснабжения СНИ не будет:

$$S_{\text{NBI, cp D}}(D_2 + T_{2 \text{ adm}}) = 0, \quad (15)$$

где S_{is} и S_{neut} — потоки газа D и T в источники ионов и нейтрализаторы всех инжекторов соответственно; $S_{0, \text{NB}}$ — поток частиц D и T из вакуумной камеры в инжекторы; N_{NBI} — количество инжекторов; $F_{\text{CX}}(E_{\text{NBI}})$ — часть ионов, превратившихся в быстрые атомы (для заданной энергии ионов E_{NBI}). Система очистки газовой смеси обеспечивает обработку всего газового потока, извлекаемого из вакуумной камеры и с криопанелей инжекторов нейтральных атомов (для всех трёх случаев $D_2 + T_2$, D_2 , $D_2 + T_{2 \text{ adm}}$):

$$S_{\text{cleanup T, D}}(D_2 + T_2, D_2, D_2 + T_{2 \text{ adm}}) = S_{\text{pump}} + S_{\text{NBI, cp}} + S_{0, \text{Li}} + S_{0, \text{coolant}}. \quad (16)$$

Мы считаем, что частицы D и T, покинувшие вакуумную камеру за счёт механизмов захвата Li и диффузии в хладагент, будут выделены и возвращены в ТЦ. Важно отметить, что в вакуумной камере изотопы будут присутствовать в атомарной форме, при этом за её пределами они будут образовывать молекулярные соединения. Их целесообразно рассматривать как в составе откачиваемой смеси, так и в системах инжекции СИП. Система очистки газовой смеси на основе мембранных палладийсодержащих фильтров может обеспечить выделение изотопов водорода в виде молекул H_2 , D_2 , T_2 и HD , HT , DT , однако их химические соединения будут отфильтрованы вместе с примесными газами и углеродосодержащими соединениями. Выделение химически связанного водорода осуществляется в системах каталитического разложения и переработки сверхтяжеловодных отходов. Поток в эту систему рассчитывается как доля от общего в соответствии с задаваемой долей химических соединений H в откачиваемом газе (f_{Hc}). Выходной поток изотопов водорода из системы будет поступать в систему восстановления изотопного состава.

Поток изотопов водорода из системы очистки будет разделяться надвое — в СРИ и СВИС:

$$S_{\text{cleanup T, D}} = S_{\text{ISS}} + S_{\text{IRS}}. \quad (17)$$

Мы считаем, что величина потока газа в СРИ будет определяться потребностями СИП в T. Как уже отмечалось ранее, в СИП из СРИ будут поступать потоки D_2 , T_2 , HT и DT , при этом компонент HT будет являться паразитным (отделение фракции HT от D_2 может оказаться затруднительным), однако кинетика изотопного состава топливной смеси позволяет считать величину этой фракции малой по сравнению с остальными. Таким образом

$$S_{\text{IRS T, D}} = S_{\text{cleanup}} - S_{\text{ISS}} = S_{\text{cleanup}} - (S_{\text{pel}} + S_{\text{puff}}(\text{pel})). \quad (18)$$

Для замыкания баланса частиц в ТЦ (1) необходимо учесть процессы радиоактивного распада T, а также потери частиц D и T за счёт насыщения конструктивных элементов и диффузии в атмосферу. В настоящее время мы используем табличные значения коэффициентов проницаемости в отсутствие более корректных экспериментальных результатов для кандидатных конструктивных сплавов. В результате для обоих типов частиц

$$S_{\text{NB}} + S_{\text{puff}}(\text{NB}) + S_{\text{GIS}} = S_{\text{IRS}} + S_{\text{decay T}} + S_{\text{losses}} = S_{\text{cleanup}} - (S_{\text{pel}} + S_{\text{puff}}(\text{pel})) + S_{\text{decay T}} + S_{\text{losses}}, \text{ т.е.} \\ S_{\text{NB}} + S_{\text{puff}}(\text{NB}) + S_{\text{pel}} + S_{\text{puff}}(\text{pel}) + S_{\text{GIS}} = S_{\text{cleanup}} + S_{\text{decay T}} + S_{\text{losses}}, \quad (19)$$

где S_{decay} и S_{losses} — потеря частиц за счёт распада и диффузии соответственно. Таким образом, все извлекаемые из вакуумной камеры частицы направляются в системы инжекции и подпитывают центральную и пристеночную плазму с учётом компенсации потерь.

Существенно, что в случае D^0 пучка СИП будет потреблять меньше частиц D, поскольку поток D будет осуществляться за счёт пучка. В этом случае фракция D_2 из СРИ должна направляться в СНИ для обеспечения потока D. Подбор параметров инжекции в том числе включает изменение частот инжекции

D_2 -, T_2 - и DT -пеллет. При удовлетворении потребностей плазмы в D и T ($5 N_D/\tau_p$ и N_T/τ_p за счёт различных инжекторов ($S_{NB}/S_{pel}/S_{GIS}$ для каждого изотопа) можно получить различные значения потоков изотопов в системах ТЦ. При этом возможны режимы, при которых избытки относительно потребности СИП фракций T_2 и DT из СРИ будут направляться в СВИС. Это обусловлено изотопным составом топливной смеси в СРИ и соответственно количеством D и T в виде той или иной фракции. При любых изменениях параметров не должны нарушаться условия (1) и (17).

Результатами расчётов блока 1 являются значения потоков двух изотопов водорода во всех системах ТЦ для различных видов нейтрального пучка ($D^0 + T^0$ и D^0) и архитектуры системы газоснабжения СНИ ($D_2 + T_2$, D_2 , $D_2 + T_{2 adm}$). Величины потоков (c^{-1} или $m^3 \cdot Pa/c$) могут быть представлены в виде массовых значений ($г/с$), но они не позволяют оценить величины накопления изотопов в системах и ТЦ в целом. Однако эти значения играют ключевую роль с точки зрения безопасности установки, а также для оценки стартового количества топлива, необходимого для введения в эксплуатацию и запуска установки. Для решения этих задач модель FC-FNS содержит блок 2.

БЛОК 2. РАСЧЁТ ЗАПАСОВ ИЗОТОПОВ В СИСТЕМАХ ТЦ

Для моделирования накопления изотопов водорода в системах ТЦ мы используем два различных подхода, описанных в [5]. Первый основан на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику T в нескольких ключевых системах (бланкет, хранилище, системы обработки T). Второй подход основан на «методе времени пребывания», для чего в модели FC-FNS построены электронные модели составляющих ТЦ систем, учитывающие технологические принципы работы этих систем. При наличии прототипов параметры элементов систем брались нами из литературы (например, для ИТЭР [13]). Оба подхода дают хорошее совпадение результатов, что позволяет судить о корректности расчётов, проводимых «методом времени пребывания» для большего числа систем ТЦ. Упрощённые схемы систем ТЦ и описание принципов их работы приведены в [14]. В текущей версии модели ТЦ смоделированы все системы, показанные на рис. 2, для которых решаются уравнения баланса частиц. Далее рассмотрим подробно эти системы и принципы расчёта накопления изотопов водорода в них.

Системы инжекции включают в себя газовые клапаны, пеллет-инжекторы и систему нейтральной инжекции. Для системы газовых клапанов прототипом служит аналогичная система для ИТЭР. Предварительная оценка длин трубопроводов с рабочим давлением 0,09/0,6 МПа и самих газовых клапанов (GVB) даёт оценку количества T/D , содержащегося в шести газовых клапанах инжекции в количестве 20 и 12 г соответственно. Для ИТЭР этот показатель в 4 раза выше [13] за счёт, очевидно, большей длины магистралей, однако и наша оценка может быть несколько занижена.

Система пеллет-инжекции, рассматриваемая для проекта ДЕМО-ТИН, также, как и для ИТЭР, подразумевает инжекцию топливных пеллет и пеллет для борьбы с ЭЛМ с различных направлений. В связи с этим мы рассматриваем данную систему по аналогии с прототипом для ИТЭР. Система подготовки пеллет включает балластные резервуары, экструдер, вакуумные насосы и резервуар-хранилище для газовой смеси. Для конструктивных параметров, близких к инжекторам ИТЭР, в одном инжекторе и трубопроводах будет содержаться до 36 г T_2 и 24 г D_2 . Следовательно, в шести инжекторах (D_2 , DT , T_2) будет накапливаться до 200 г трития (в зависимости от режима работы соответствующих инжекторов) и 140 г D_2 . Значение для одного инжектора вполне соответствует оценкам для системы ИТЭР.

Система нейтральной инжекции будет содержать T в значительных количествах только для сценария использования $D_2 + T_2$ -газа для газоснабжения нейтрализаторов и источников ионов. В любом другом случае запасы T будут несравнимо меньше за счёт того, что доля T (f_T) в системе газоснабжения СНИ не будет превышать 5% [3, 5]. Зная потоки газа в источники ионов и нейтрализаторы [3] и поток частиц в окна инжекторов со стороны первой стенки (в настоящее время используем S_{sep} в качестве оценки, хотя это не вполне корректно), мы рассчитываем темпы накопления изотопов на криопанелях каждого инжектора за время до их регенерации. Расчёты показывают, что за время работы каждого инжектора (более 3 ч) сорбционная способность криопанелей практически не будет снижаться. Для сценария использования $D^0 + T^0$ -пучка время между последовательными этапами регенерации криопанелей каждого инжектора будет меньше (1,4 ч) за счёт достижения ограничения [15] на максимальное количество T в одном месте. Для

сценариев D^0 -пучка время работы (до регенерации) ограничено накоплением допустимой концентрации изотопов водорода (2% от объёма корпуса при н.у.) в инжекторе с точки зрения взрывоопасности. Количество Т в СНИ при этом будет незначительным (~ 1 г). Для $D^0 + T^0$ -пучка это значение может достигать 300 г. В настоящее время мы не рассматриваем вопрос накопления гелия в системе газоснабжения СНИ.

Система откачки из диверторов перекачивает наибольшее количество газовой смеси, содержащей тритий. В её составе предусмотрена вспомогательная система форвакуумной подготовки, а также высоковакуумная система, состоящая из 36 насосов в верхнем и нижнем сечениях установки (верхний и нижний диверторы) для двухнулевой магнитной конфигурации установки. На текущем этапе мы рассматриваем откачку вакуумной камеры посредством крионасосов, аналогичных предусмотренным в проекте ИТЭР. Время до регенерации насосов выбрано нами по аналогии 450 с [13]. При этом на криопанелях всех насосов будет одновременно содержаться ~ 3 г трития и 1 г дейтерия, не считая газа в вакуумной камере, диверторах и трубопроводах. Такой подход наиболее оправдан с точки зрения откачки гелия, однако он может быть не очень эффективен для обеспечения необходимых условий работы диверторов. Эта задача требует дальнейшей оптимизации, в том числе выбора типов насосов.

Количество изотопов водорода, содержащихся в вакуумной камере и откачных патрубках диверторов, принимается нами меньшим, чем количество частиц, поглощённых (и удерживаемых) конструкционными материалами камеры, первой стенки и пр. Объём газовой смеси в магистралях вакуумной системы оценивается нами также сверху, исходя из сведений о магистралях ТЦ проекта ИТЭР [13]. Производя оценки сверху для содержания Т во внутрикамерных элементах из принятых проектом ДЕМО-ТИН конструкционных материалов, получим, что вакуумная камера может содержать до 110 г Т. Сопоставимая величина 140 г может содержаться в трубопроводах и ресиверах вакуумной системы ТЦ.

Целый ряд систем ТЦ подразумевают выделение изотопов водорода из газовой смеси по принципу проницаемости через мембранный фильтр. При этом химический состав мембраны обеспечивает проникновение только изотопов водорода; химические соединения изотопов водорода, а также иные газы не будут проникать через мембрану. Для расчёта систем, использующих подобный принцип работы (извлечения Т из blankets, мембранного разделения топливной смеси, выделения Т из лития, выделения Т из хладагента первой стенки и дивертора), мы рассчитываем работу одного мембранного элемента для заданных условий и масштабируем систему, исходя из данных о потоках в системе ТЦ, чтобы обеспечить требуемую производительность. Для выделения изотопов водорода из газовой смеси мы рассматриваем мембранный элемент из сплава палладия трубчатой формы с толщиной стенки 10—100 мкм (при этом нижняя граница соответствует достижимому технологическому пределу, обеспечивающему максимальную производительность).

Для оценки количества изотопов водорода, проникших через конструкционные материалы в каналы с хладагентом в системах охлаждения первой стенки и дивертора, мы моделируем процессы проницаемости конструкционных материалов, принятых для проекта ДЕМО-ТИН с учётом рабочих давлений и температур. В настоящее время мы используем табличные значения коэффициентов проницаемости в отсутствие более корректных экспериментальных результатов для кандидатных конструкционных сплавов. Расчёты проникающих потоков показывают целесообразность применения мембранных фильтров для выделения Т из хладагента в рассматриваемых системах (достаточно одного в каждой системе). Количество Т, содержащегося в мембранных элементах, ~ 1 г для каждой системы.

В проекте ДЕМО-ТИН предполагается наличие лития на первой стенке вакуумной камеры и, концептуально, в диверторе. Нами рассматривается процесс захвата литием D и T с последующим выделением на мембранном фильтре. Коэффициент захвата изотопов водорода принят нами на основании экспериментов [17]. Однако такая оценка может оказаться несколько завышенной, так как при температурах, ожидаемых для Li, изотопы водорода могут выходить из металла до момента достижения мембранных элементов. В наших расчётах мембранная система содержит ~ 1 г трития в 5—10 мембранных элементах, необходимых для обработки проникающего потока.

Система мембранной очистки топливной смеси должна обеспечить наибольшую производительность (после системы откачки). В сценарии использования $D^0 + T^0$ -пучка в данную систему, помимо потока из откачки системы вакуумной камеры, будет направляться поток с криопанелей СНИ. Отсутствие трития в СНИ в случае D^0 -пучка снижает требования к производительности системы очистки практически на порядок. Это отразится на количестве мембранных элементов при выбранном нами подходе к

проектированию системы. Очевидно, что применение более тонких проницаемых мембран также приведёт к сокращению количества элементов за счёт обеспечения большего проникающего потока. Однако деградация мембран, наблюдаемая для подобных систем [18], может быть более выражена, что может существенно осложнить условия эксплуатации и обслуживания (ремонта/замены элементов) системы. Оптимизация данной системы требует значительной расчётной и экспериментальной деятельности. Мы рассматриваем в составе системы 150 элементов, обеспечивающих требуемую производительность во всех рассматриваемых сценариях. Содержание Т в элементах системы ~4 г.

Выделение трития из гибридного бланкета установки ДЕМО-ТИН подразумевает прокачку рабочего газа (He) через необслуживаемые модули бланкета, заполненные ортосиликатом лития, с последующей фильтрацией газа-носителя на мембранном элементе. Расчёт нарабатываемого трития за счёт взаимодействия нейтронов с Li_4SiO_4 показывает давление Т в модулях бланкета на уровне $8 \cdot 10^{-4}$ МПа и поток в систему выделения ~0,06 м³·Па/с. Для обработки такого потока вполне достаточно одного мембранного элемента, хотя целесообразно предусмотреть большее количество с точки зрения надёжности работы/резервирования. Общее количество Т, содержащегося в бланкете, 65 г, из которых <1 г — в мембранном элементе.

Система каталитического разложения химических соединений водорода должна обеспечить обработку потока из системы мембранного разделения, не прошедшего через фильтр, но содержащего изотопы водорода. Для обеспечения обработки непрерывного входного потока мы рассматриваем несколько модулей, загружаемых газом последовательно. Мы считаем, что изотопы водорода (большая часть потока) будут довольно быстро извлекаться из системы. Для этого в каждом модуле будут установлены мембранные фильтры. Малая часть потока, которую невозможно выделить в этой системе, будет сбрасываться в систему переработки сверхтяжеловодных отходов. Размещение на выходе системы ресивера позволит получать выходной поток постоянной величины. Для рассматриваемых нами 15 модулей содержание Т в системе составляет 12 г.

Как было подробно описано в [19], система разделения изотопов водорода, содержащая довольно много изотопов водорода за счёт длительного цикла разделения, смоделирована нами весьма грубо, однако неполное разделение газовой смеси [19] позволяет накапливать в системе не более 50 г, что в настоящее время приемлемо.

Система хранения газовой смеси должна обеспечить хранение всего газа, содержащегося в ТЦ (на момент запуска и/или остановки установки), а также содержать запасы топлива для непрерывной работы всех систем ТЦ. В систему хранения входят долговременное хранилище для сбора наработанного в бланкете трития и геттерные хранилища для D₂ и T₂, содержащие соответствующий газ. Для стационарной работы установки расход Т в процессе термоядерного горения должен быть обеспечен его бридингом в бланкете, однако в геттерном хранилище должен быть запас Т на случай остановки тритийвоспроизводящих систем.

По всей видимости, данные хранилища целесообразно делать модульными, состоящими из отдельных резервуаров, объединённых в систему. Объёмы систем должны соответствовать требованиям, предъявляемым к ним. Так, «стартовое хранилище» — часть системы хранения — должно вмещать всю газовую смесь в ТЦ с учётом потерь на сорбцию конструкционными материалами и β-распад Т. Долговременное хранилище должно обеспечить хранение Т, наработанного в бланкете с учётом темпа наработки Т и периодичности его извлечения из хранилища для нужд сторонних потребителей. Оставшаяся часть геттерного хранилища должна содержать газы с учётом периодичности пополнения их запасов, темпа расхода Т и времени остановки тритийвоспроизводящих систем.

Стартовое хранилище должно вмещать 1250(1500)/550(500) г T₂ и 850(650)/1000(1050) г D₂ для сценариев D⁰ + T⁰/D⁰-пучка для случаев $f_T = 0,5, 0,7$ соответственно. Долговременное хранилище должно вмещать до 500 г T₂ для коэффициента воспроизводства трития TBR = 1,2 и при извлечении наработанного трития через год. Мы считаем, что для остановки систем воспроизводства трития на 20 дней потребуется хранить запас 130 г. Следовательно, в целом в установке будет содержаться от 1400(1650)/700(650) до 1800(1650)/850(1050) г T₂ с учётом распада наработанного Т, включая тритий в долговременном хранилище.

БЛОК 3. ФОРМИРОВАНИЕ БАЛАНСА ПОТОКОВ В ПЛАЗМЕ

Как было отмечено, при обеспечении условия (9) системами инъекции реализуется стационарный баланс частиц D и T, который рассчитывается для всех систем ТЦ в блоке 1. При этом потоки частиц через системы инъекции могут отличаться от желаемых (9). В этих случаях баланс частиц в ТЦ (19) не сходится.

Для установления баланса потоков в плазме проводятся итерации с блоком 1. Это реализовано в блоке 3 следующим образом: для начальных условий решаются уравнения (2)—(10), причём последнее принимает вид

$$S_{\text{injection}, i} = S_{\text{NB}, i} + S_i + S_{\text{pel}, i} + S_{\text{puff}(\text{pel}), i} + S_{\text{GIS}, i} = S_{\text{cleanup}, i-1} + S_{\text{decay T}} + S_{\text{losses}}, \quad (20)$$

где индексы $i-1$ и i обозначают итерации при последовательном вычислении. Далее производится поиск новых решений (2)—(18), (20). Таким образом учитывается сохранение всех частиц в ТЦ при обороте (откачка—переработка—инжекция) топливной смеси, т.е. все откачанные из вакуумной камеры частицы должны быть инжектированы обратно для предотвращения их необоснованного накопления в какой-либо системе, а все инжектированные частицы соответственно откачаны. При этом значения потоков через системы ТЦ могут меняться за счёт изменения потоков через вакуумную камеру и параметров плазмы. При итерационном решении уравнений (1)—(16), (18) рассчитываются стационарные значения потоков через системы ТЦ и визуализируется динамика этих величин. На рис. 3—5 показаны характерные примеры визуализации получаемых результатов.

Рис. 3. Потоки T (—) и D (—) через системы ТЦ (по горизонтальной оси) в абсолютных (с⁻¹) величинах (а, в), а также изотопный состав газа в них ($C_{D,T}$, %) (б, г). Приведены гистограммы для случаев пучка $D^0 + T^0$ ($f_T = 0,5$) (а, б), пучка D^0 ($f_T = 0,7$) (в, г) как наиболее эффективных с точки зрения P_{fus} и бридинга T

Рис. 4. Динамика потоков (с⁻¹) изотопов в ключевых системах ТЦ при последовательных циркуляциях топлива. Показаны случаи $D^0 + T^0$ -пучка ($f_T = 0,5$), состав газа в СНИ: D + T (а), D^0 -пучка ($f_T = 0,7$) состав газа в СНИ: $D_2 + T_{2 \text{ adm}}(5\%)$ (б)

Гистограммы на рис. 3 показывают абсолютные значения потоков T и D через системы ТЦ, а также изотопный состав газа в них для случаев $D^0 + T^0$ - и D^0 -пучка. Видно, что использование смеси $D_2 + T_2$ во всех системах, включая СНИ, обеспечивает малое изменение изотопного состава газовой смеси в системах ТЦ, однако требует больших значений потоков через эти системы. На рис. 4 показана динамика по-

Рис. 5. Изменение фракции трития в основных системах ТЦ: — плазма; — откачка; — очистка; — инжекция ($f_T = 0,5$ в плазме). Горизонтальная шкала показывает этапы расчёта — количество последовательных циклов подачи топлива по всем системам ТЦ, состав газа в СНИ: $D + T$ (a), $D_2, D_2 + T_{2 adm} (5\%)$ (б)

токов D и T в системах инжекции для различных вариантов системы газоснабжения СНИ. Изменение значений потоков, показанных на рис. 3, при последовательных итерациях показано на рис. 4. Такие графики, рассчитываемые для всех систем ТЦ в модели FC-FNS, позволяют наглядно контролировать режимы работы систем, что, в свою очередь, позволяет судить о корректности моделируемых режимов инжекции и работы ТЦ в целом. Контроль изменения изотопного состава топливной смеси в ключевых системах ТЦ (см. рис. 5) — основной плазме, системах откачки, очистки, восстановления изотопного состава и инжекции позволяет судить о режимах работы этих систем и характере газовой смеси в них. Заметные различия в составе газа (f_T) в разных системах ТЦ наблюдаются для сценариев D^0 -пучка. Изменения параметров основной плазмы за счёт нарушения (9) для D или T до выхода на стационарные значения при работе систем инжекции в заданном режиме требуют дополнительного анализа с точки зрения обеспечения режима удержания и согласования с пристеночной плазмой.

Таким образом, блок 3 позволяет обеспечить моделирование режимов, в том числе с изменением изотопного состава плазмы, за счёт неполного удовлетворения требований по частицам D и T . Получаемые результаты показывают превышение требуемого значения c_p над $c_p(0)$, а также зависимости откачиваемого потока S_{pump} и необходимой для этого скорости откачки c_p для различных составов топливной смеси фракции трития f_T в плазме и изотопного состава пучка нейтронов.

РАСЧЁТЫ ПОТОКОВ ДЛЯ СОГЛАСОВАННЫХ ИСХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ

Основные параметры ТЦ ДЕМО-ТИН для модели FC-FNS:

Доля T в плазме f_T . . .	0,5—0,7
Доля H в плазме f_H . . .	0,01
Доля Ne в плазме на сепаратрисе f_{Ne} . . .	0,02
Поток нейтронов $G_n, 10^{19} \text{ c}^{-1} D^0 + T^0, NB$. . .	1,34—1,47*
Поток нейтронов $G_n, 10^{19} \text{ c}^{-1} D^0, NB$. . .	1,46—1,23*
Плотность плазмы $\langle n \rangle, \text{м}^{-3}$. . .	$0,7 \cdot 10^{20}$

Мощность синтеза P_{fus} , МВт . . .	40
Мощность, подводимая к SOL, P_{SOL} , МВт . . .	36,5
Время удержания энергии τ_E , мс . . .	700—900
Коэффициент удержания частиц τ_p/τ_E . . .	3—4
Приведённое нейтральное давление в диверторе p_n , Па . . .	4,0
Коэффициент воспроизводства трития (КВТ) . . .	1,2
Пеллет-инжекторы $T_2/D_2/DT$ (HFS + LFS), шт. . . .	1 + 1/1 + 1/1 + 1
Частота пеллет-инжекторов, Hz . . .	5—15
Размер пеллет, мм ³ . . .	1—2,5
Концентрация примесей в пеллетах f_{adm} , % . . .	10
Мощность дополнительного нагрева P_{NB} , МВт . . .	30
Энергия пучка дополнительного нагрева E_{NB} , кэВ . . .	500
Инжекторы нейтральных частиц, шт. . . .	6
Эффективность ввода частиц (NB) в основную плазму k , % . . .	90
Эффективность ввода частиц (pellet) HFS/LFS в основную плазму k , % . . .	90/50
Доля химических соединений Н в откачиваемом газе f_{HCC} , % . . .	2
Время остановки наработки Т, дней (Т должен храниться в геттере) . . .	20
Цикл разделения изотопов, ч (для чистоты разделения изотопов $\geq 90\%$) . . .	1
Цикл каталитической переработки химических соединений водорода, ч . . .	12

*Для случаев $f_T = 0,5—0,7$ соответственно.

Согласованные параметры основной плазмы [9] при фиксированных тепловых нагрузках в диверторе взяты в качестве исходных значений для расчётов потоков изотопов водорода в ТЦ. Целью оптимизации является сокращение накопления изотопов водорода в системах ТЦ.

Интеграция в FC-FNS результатов расчёта параметров основной и диверторной плазмы позволила перейти на новый уровень моделирования физических эффектов. Так, раньше мы рассматривали СИП в качестве источника частиц в плазму с малой эффективностью $\sim 5\%$ и не рассматривали поток из дивертора $S_{0, \text{sep}}$, давление в диверторе оценивалось нами из общих соображений и количества частиц, требующих откачки из вакуумной камеры, скорость откачки рассчитывалась исходя из этого давления,

Рис. 6. Зависимость потока $S_{\text{NB}} + S_{\text{pel}}$, который должен быть обеспечен системами инжекции, от времени удержания частиц τ_p при различных значениях плотности плазмы $\langle n_e \rangle$ (— $\langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{20}$, — $\langle n_e \rangle = 0,7 \cdot 10^{20}$, --- $\langle n_e \rangle = 0,3 \cdot 10^{20}$), а также от $\langle n_e \rangle$ при различных значениях τ_p (— $\tau_p = 1,5$ с, — $\tau_p = 2,3$ с, --- $\tau_p = 3,2$ с). На графике снизу показаны величины потоков, обеспечиваемых системой нейтральной инжекции (NB) D (1, 3), T (2) для сценариев пучка D^0 (1) и $D^0 + T^0$ (3). Фракция трития $f_T = 0,7$

проникающие потоки через первую стенку (ПС) и стенки вакуумной камеры считались также, потоки на ПС считались также из эмпирических соотношений. Новый подход привёл к уменьшению потока в систему откачки и потоков, которые должны обеспечивать системы инжекции.

Величины топливных потоков, которые должны быть обеспечены инжекционными системами (9), находятся в тесной связи с параметрами основной плазмы. Рис. 6 показывает зависимость потока $S_{\text{NB}} + S_{\text{pel}}$ от плотности плазмы $\langle n_e \rangle$ и времени удержания частиц τ_p . Видно, что увеличение $\langle n_e \rangle$ приводит к росту $S_{\text{NB}} + S_{\text{pel}}$ и уменьшить поток инжекции можно, увеличивая τ_p . Оптимизация параметров плазмы для удобства управления её параметрами (требует уменьшения τ_p) и обеспечения режимов генерации тока (приводит к снижению $\langle n_e \rangle$ [9]) при согласованных потоках инжекции является сложной перспективной задачей.

Расчёты, проведённые в [9], показали, что использование примеси Ne в диверторе приводит к снижению как общей плотности плазмы $\langle n_e \rangle$, так и плотности $D + T$ ($\sim 0,85 \langle n_e \rangle$) при $\tau_{\text{imp}} = \tau_p$. Использование согласованных параметров плазмы

для такого случая показало снижение требований по инжекции топлива и потоков в целом. С уменьшением потребности плазмы в топливных потоках $S_{NB} + S_{pel}$ доля частиц, поступающих в основную плазму с пучком, значительно возросла. Следует отметить, что это упростило задачу подбора параметров инжекции, поскольку ранее были задействованы PIS-инжекторы для всех фракций, а теперь оказалось достаточно только для T_2 (и D_2 для некоторых сценариев). Для значений $c_p \sim 2-3c_p(0)$ во всех системах ТЦ достигаются значения $f_T(k)$, стационарные по времени (шагам расчёта). Это означает, что при скорости откачки $10-20 \text{ м}^3/\text{с}$, что достижимо для двух диверторов, можно обеспечивать требуемое p_n при эффективной инжекции топлива в основную плазму.

Существенно, что с изменением параметров плазмы и, следовательно, требуемых потоков $S_{NB} + S_{pel}$ роль потока частиц, вносимых в основную плазму нейтральным пучком S_{NB} , будет изменяться при заданных параметрах дополнительной инжекции P_{NB} и E_{NB} . В случае использования пучка $D^0 + T^0$ он будет доставлять в основную плазму $\sim 30\%$ частиц от необходимого количества $S_{fus} + S_{sep} - S_{0, sep}$ (2). При этом суммарное накопление T в системах ТЦ будет выше за счёт T в системе газоснабжения СНИ. При использовании D^0 -пучка присутствие трития в СНИ будет несущественным, и его можно будет контролировать периодической очисткой газовой смеси [3, 5]. D^0 -пучок будет обеспечивать $>60\%$ от необходимого количества частиц D ($S_{fus} + S_{sep} - S_{0, sep}$), следовательно, доля частиц D , которую должна обеспечить СИП, составляет $<40\%$. Однако при этом $S_{NB}(T) = 0$ и инжекция трития в основную плазму должна быть полностью обеспечена СИП. Потоки D_2 и DT из СРИ, не использованные для пеллет-инжекции, будут вводиться в вакуумную камеру с помощью СГК, приводя к изменению f_T в СВИС и СГК, а также в диверторе. Это потребует при тех же нагрузках в диверторе больших значений S_{pump} и c_p , чем в случае пучка $D^0 + T^0$.

Увеличение значений откачиваемых и обрабатываемых потоков топлива приведёт к возрастанию нагрузки на все системы ТЦ и требований к их производительности, что повлечёт возрастание капитальных и эксплуатационных затрат, связанных с этими системами. Был проведён анализ зависимости потока G_p от режимов инжекции. Для обоих типов пучка при инжекции топливных пеллет только посредством T_2 —СИП значения потоков в системе откачки S_{pump} оказываются самыми высокими и требуют высоких скоростей откачки c_p . Распределение топливных потоков S_{pel} между T_2 , DT и D_2 —СИП приводит к значительному снижению S_{pump} и соответственно c_p , при этом требуемая скорость откачки превосходит $c_p(0)$ в 2—5 раз. На рис. 7 показано изменение значений S_{pump} и c_p в зависимости от режимов T_2 , DT и D_2 —СИП при различных f_T и типе используемого пучка. В настоящее время при моделировании мы не разделяем топливные пеллеты (HFS) и пеллеты (LFS) для управления ЭЛМ (ELM-control), считаем их одинаковыми, частоты инжекторов HFS и LFS для соответствующей фракции топлива принимаем равными. Конкретные режимы работы инжекторов существенно зависят от параметров основной плазмы.

Проблема обмена частицами между плазмой и стенкой, а именно многократно повторяющейся последовательности нейтрализации ионов на поверхности и ионизации образующихся нейтралов, позволяет рассматривать стенку в качестве бесконечно большого источника частиц по сравнению с плазмой. В стационарных условиях насыщенной стенки обмен частицами между плазмой и стенкой приводит к динамическому равновесию между потоками частиц из плазмы и потоками частиц, отражённых или десорбированных со стенки. Поскольку эти параметры по-разному зависят от параметров плазмы и стенки, при любом изменении состояния плазмы или стенки можно ожидать нарушения баланса в ту или другую сторону и соответственно эффективной сорбции или десорбции рабочего газа стенкой. Если компенсировать эффективную откачку стенкой относительно легко увеличением напуска газа, то компенсация противоположного эффекта значительно сложнее. По-

Рис. 7. Зависимости откачиваемого потока S_{pump} и скорости откачки c_p от фракции трития f_T в плазме для сценариев пучка $D^0 + T^0$ (●), пучка D^0 и пеллет-инжекции T_2 (■) и пучка D^0 и пеллет-инжекции $D_2 + T_2 + DT$ (▲) при постоянном значении p_n

сколькx увеличение скорости откачки (в 2 и более раз) за малое время нереально, придётся обеспечивать интенсивность напуска газа (и откачки), близкую к максимально достижимой, для получения возможности её уменьшения в случае излишнего выделения газа со стенок [6]. При интегральном потоке частиц через системы ТЦ $3 \cdot 10^{21}$ ат./с, рассчитанном исходя из стационарных потоков через плазму, система откачки должна быть рассчитана на потоки, на порядок большие. Для поддержания давления в диверторе $p_n \sim 4$ Па и приемлемых тепловых нагрузок на диверторные пластины во всех рассмотренных сценариях работы потребуется обеспечить скорость откачки $\sim 10\text{--}20$ м³/с (поток в систему откачки составит $S_{\text{pump}} = c_p p_n = 100\text{--}200$ м³·Па/с), что достижимо для двухдиверторной конфигурации, однако требует большой работы по расчёту рециклинга частиц и оптимизации системы откачки.

Изменение фракции трития f_T в плазме приводит к изменению параметров плазмы и мощности синтеза за счёт изменения соотношения $P_{\text{DT_pp}}/P_{\text{DT_bp}}$, где $P_{\text{DT_pp}}$ — мощность синтеза в результате механизма плазма—плазма и $P_{\text{DT_bp}}$ — за счёт механизма пучок—мишень [9]. При этом изменяется нейтронный поток, который, в свою очередь, влияет на количество нарабатываемого в бланкете трития. Поскольку в модели ТЦ FC-FNS предусматривается наличие гибридного бланкета, мы рассчитываем сценарии наработки трития в различных вариантах работы установки (обеспечения её топливом).

На рис. 8 представлены зависимости полной мощности синтеза P_{fus} и его составляющих: плазма—плазма и пучок—мишень, а также величины нейтронного потока G_n от f_T для различных типов используемого пучка. На рис. 9 показаны зависимости содержания трития в ТЦ с учётом наработки трития и его выгорания в плазме для сценариев с пучком $D^0 + T^0$ и D^0 от фракции трития f_T в плазме.

Рис. 8. Величина нейтронного потока (10^{19} с^{-1}), полная мощность синтеза P_{fus} ($\blacktriangle$), ($\bullet$) и её составляющие: плазма—плазма ($\bullet$), ($\circ$) и пучок—мишень ($\Rightarrow$), ($=$) в зависимости от f_T в плазме для D^0 - и $D^0 + T^0$ -пучка соответственно

Рис. 9. Содержание трития в системах ТЦ в зависимости от фракции трития f_T в плазме для пучка $D^0 + T^0$ ($\blacklozenge$) и пучка D^0 ($\blacklozenge$). Также на графике приведено количество трития, нарабатываемого в бланкете за 1 год, с учётом его выгорания в плазме для пучка $D^0 + T^0$ ($\text{---}\times\text{---}$) и пучка D^0 ($\text{---}\times\text{---}$)

Расчёты показали, что максимальная общая мощность синтеза и соответственно нейтронного потока ожидается в случае $f_T = 0,5$ для $D^0 + T^0$ -пучка и $f_T = 0,7$ для D^0 -пучка. Нами рассмотрен интервал $f_T = 0,5\text{--}0,7$ для вариантов $D^0 + T^0$ - и D^0 -пучка.

В табл. 1 приведены потоки частиц через системы инжекции и откачки для ТЦ ДЕМО-ТИН в модели FC-FNS для параметров плазмы, рассмотренных в [9]. Для сравнения приведены значения в случаях пучка $D^0 + T^0$ (для $f_T = 0,5$) и пучка D^0 (для $f_T = 0,7$) как наиболее эффективных с точки зрения P_{fus} и бридинга Т. Потоки для разных изотопов (Т и D) приведены отдельно — это наглядно показывает взаимосвязь $S_{\text{NB}}/S_{\text{pel}}$ для D и T. В табл. 2 показаны потоки частиц через основные системы ТЦ для сценариев пучка $D^0 + T^0$ ($f_T = 0,5$) и пучка D^0 ($f_T = 0,7$). Эти значения могут быть использованы в дальнейшей работе для выбора кандидатных технологий для выделения водорода, разделения изотопов, детритизации извлекаемых из

Т а б л и ц а 1. Основные потоки частиц в системах инжекции и откачки для ТЦ ДЕМО-ТИН в модели FC-FNS*

Сценарий	$S_{\text{NB}}, 10^{19}/\text{с}$	$S_{\text{pel}}, 10^{19}/\text{с}$	$S_{0 \text{ sep}}, 10^{19} \text{ с}^{-1}$	$S_{\text{sep}}, 10^{19} \text{ с}^{-1}$	$S_{\text{puff}}, 10^{19} \text{ с}^{-1}$	$S_{0 \text{ NB}}, 10^{19}/\text{с}$
$D^0 + T^0_{\text{NB}}$	18,7/18,7	46,1/46,1	88,2/88,2	151,6/151,6	81,5/81,5	0,25/0,25
D^0_{NB}	0/37,5	90,2/2,0	123,4/52,9	212,2/91,0	114,1/29,4	0,37/0,16

*Приведены значения потоков Т/D, оптимизированные для сценариев для пучка $D^0 + T^0$ ($f_T = 0,5$) и пучка D^0 ($f_T = 0,7$) как наиболее эффективных с точки зрения P_{fus} и бридинга Т.

вакуумной камеры газов. Принципы дальнейшей оптимизации наиболее перспективных технологий также находятся на рассмотрении.

Т а б л и ц а 2. Потоки частиц через основные системы ТЦ для сценариев пучка $D^0 + T^0$ ($f_T = 0,5$) и пучка D^0 ($f_T = 0,7$)

Сценарий	Откачка, моль/с	Очистка, разделение газов, моль/с	Разделение изотопов, моль/с	Восстановления изотопного состава, моль/с	Инжекция СИП, СНИ, СГК, моль/с	Бланкет, моль/с
$D^0 + T^0_{NB}$	0,0015/0,0015	0,0235/0,0235	0,0012/0,0012	0,0223/0,0223	0,0012/0,0012; 0,0011/0,0011; 0,0208/0,0208	0,0002/0
D^0_{NB}	0,0022/0,0007	0,0037/0,0012	0,0024/0,001	0,0013/0,0012	0,0024/0; 0,0014/0,0006; 0/0,0417	0,0001/0

Основные запасы трития будут сосредоточены в системах с циклическим режимом работы — это системы для извлечения/разделения/очистки изотопов водорода. Оптимизация этих систем является важной задачей. Одной из таких критических систем ТЦ принято считать СРИ. Для сокращения запаса изотопов в ТЦ и, в частности, в СРИ мы предполагаем разделение изотопной смеси до чистоты $\sim 0,9$ (как в СИП проекта ИТЭР [13]). С одной стороны, при таком изотопном составе снижение механической прочности пеллеты мы считаем приемлемым, с другой, это позволит значительно сократить время обработки газовой смеси. В результате системы подготовки пеллет для инжекции будут снабжаться фракциями с примесью других изотопов (мы считаем, $D_2 + T_{2 adm}$ для D_2 —СИП и $T_2 + D_{2 adm}$ для T_2 —СИП). Наличие примесей D_2 и T_2 в DT-фракции нами не учитывается.

Контроль доли He в топливной смеси происходит в процессе очистки газовой смеси на мембранном фильтре, с помощью которого весь He отделяется от изотопов водорода. Мы считаем, что в плазме $\tau_{He} = 4\tau_E \sim \tau_p$. Полученная в результате такого подхода оценка относительной концентрации гелия в основной плазме $\langle n_{He} \rangle / \langle n_e \rangle$ составляет около $\sim 0,4\%$. Контроль доли H_2 происходит за счёт удаления фракций H_2 и HD в СРИ. Даже с учётом того, что фракция HT будет оставаться в топливной смеси, доля протия в плазме ожидается на уровне $\sim 0,5\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электронная модель ТЦ ДЕМО-ТИН FC-FNS была использована для исследования распределения и накопления изотопов водорода в системах топливного цикла термоядерного источника нейтронов на основе стационарного токамака с мощностью DT-синтеза 10—50 МВт. Поскольку топливные потоки в вакуумной камере распределяются между центральной и пристеночной плазмой, впервые проведено совместное моделирование газовых, твердотельных и плазменных потоков топливных смесей в этих областях. Выполненное моделирование позволило оценить окно рабочих параметров для ДЕМО-ТИН при инжекции примеси неона в диверторы. Результаты совместного моделирования центральной и диверторной плазмы, аппроксимированные аналитическими формулами, интегрированы в FC-FNS. Согласованные параметры основной плазмы были использованы в качестве исходных значений при моделировании потоков изотопов водорода в топливных системах ДЕМО-ТИН. Изменения в FC-FNS позволили корректнее оценивать значения потоков с учётом параметров основной и диверторной плазмы. Обоснована возможность снижения потоков водорода в системах откачки и инжекции.

Для принятых ранее к рассмотрению сценариев использования $D^0 + T^0$ - и D^0 -пучков дополнительно нагрева рассчитано накопление трития в ТЦ, а также количество нарабатываемого в гибридном бланкете трития при различной доле T в основной плазме. Показано, что при применении D + T-пучка целесообразно поддерживать $f_T = 0,5$, при больших значениях возрастает содержание T в элементах ТЦ и снижается количество наработанного T. При использовании D-пучка более целесообразно $f_T = 0,6—0,7$, так как скорость наработки T увеличивается более чем в 2 раза по сравнению с $f_T = 0,5$, а накопление T в элементах ТЦ зависит от f_T незначительно.

Была принципиально пересмотрена инжекция топлива различными системами, в результате газовые клапаны не рассматриваются нами в качестве способа подпитки основной плазмы топливом. Основным способом подпитки принята инжекция топливных пеллет, которая теперь представлена отдельными инжекторами D_2 , T_2 , DT и осуществляется с HFS и LFS. Проанализирована работа систем инжекции ТЦ

ДЕМО-ТИН в зависимости от параметров основной плазмы и оценены газовые потоки при различных режимах инъекции $D_2/T_2/DT$ -пеллет.

Использование примеси Ne в диверторе приводит к снижению общей плотности плазмы, плотности $D+T$ в плазме и, как следствие, потоков топлива в системах инъекции. В результате снижения общего инжектируемого в плазму потока топлива возрастает доля частиц, инжектируемых в плазму нагревным пучком. Для сценария D^0 -пучка и $f_T = 0,7$ это практически означает достаточность только одного инжектора пеллет — для фракции T_2 , так как потребность в D_2 будет полностью удовлетворена пучком нейтральных частиц из СНИ.

Расчёт накопления изотопов водорода в системах ТЦ показал, что стартовое хранилище ДЕМО-ТИН должно вмещать от 500 до 1250 г T_2 и 850—1050 г D_2 для сценариев D^0 - и $D^0 + T^0$ -пучков соответственно. Долговременное хранилище должно вмещать до 500 г T_2 (при коэффициенте воспроизводства трития $TBR = 1,2$ и извлечении наработанного трития раз в год). Резервные запасы, необходимые для остановки систем воспроизводства трития, составят 130 г T_2 . Следовательно, во всех системах установки будет содержаться от 1050 до 1800 г T_2 с учётом распада наработанного T , включая тритий в долговременном хранилище.

Выбранные режимы инъекции для сценариев использования $D^0 + T^0$ - и D^0 -пучков позволили сформулировать требования к производительности для ключевых систем ТЦ, в которых содержится наибольшее количество T за счёт циклического режима их работы. Однако при интегральном потоке частиц через системы ТЦ $3 \cdot 10^{21}$ атом/с система откачки должна быть рассчитана на потоки, на порядок большие для обеспечения эффективной откачки в случае газовыделения из внутрикамерных элементов и поддержания давления в диверторе $p_n \sim 4$ Па и приемлемых тепловых нагрузок на диверторные пластины во всех рассмотренных сценариях работы. Это потребует обеспечения скорости откачки $\sim 10\text{—}20$ м³/с ($S_{\text{pump}} = c_p p_n = 100\text{—}200$ м³·Па/с), что достижимо для двухдиверторной конфигурации.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (№ 18-72-10162). Результаты расчётов по моделированию диверторной плазмы получены с использованием вычислительных ресурсов ОБК НИЦ «Курчатовский институт», <http://computing.nrcki.ru/>.

REFERENCES

1. Kuteev B.V., Shpanskiy Yu.S. and DEMO-FNS Team. — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, p. 076039 (8 p.).
2. Ananyev S.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V. — Fusion Engineering and Design, 2019, vol. 138, pp. 289—293, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.003>.
3. Ananyev S.S., Dlugach E.D., Krylov A.I., Kuteev B.V., Panasenkov A.A. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2018, vol. 41, issue 1, p. 5, doi: 10.21517/0202-3822-2017-41-1-5-17 (in Russian).
4. Ananyev S.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V. — Fusion Engineering and Design, 2016, vol. 109—111, pp. 57—60.
5. Ananyev S.S., Spitsyn A.V. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2017, vol. 40, issue 1, p. 68, doi: 10.21517/0202-3822-2017-40-1-68-82 (in Russian).
6. Kukushkin A.S. et al. — J. Nucl. Mater., 2011, vol. 415, pp. S497—S500.
7. Pacher G.W. et al. — Nucl. Fusion, 2011, vol. 51, p. 083004.
8. Frattolillo A., Bombarda F., Day Chr., Lang P.T., Migliori S., Pégouriéd B. — Fusion Engineering and Design, 2017, vol. 124, pp. 846—849.
9. Dnestrovskiy A.Yu., Kukushkin A.S., Kuteev B.V., Sergeev V.Yu. — In: 27th IAEA Intern. Conf. on Fusion Energy. Ahmedabad, India, 2018, FIP/P1-12.
10. Pacher H.D. et al. — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, pp. 591—595; <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.11.104>.
11. Kukushkin A.S. et al. — Nucl. Fusion, 2003, vol. 43, pp. 716—723.
12. Pacher G.W. et al. — Nucl. Fusion, 2008, vol. 48, p. 105003.
13. ITER Baseline. Plant Description (PD), 2009.
14. Ananyev S.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V. — Physics of Atomic Nuclei, 2015, vol. 78, № 10, p. 1138; doi: 10.1134/S1063778815100026.
15. Technical Basis for the ITER-FEAT Outline Design, ITER EDA Documentation Series, № 19. — Vienna: IAEA, 2000.

16. **Giors S., Boussier B., Dremel M., Koseka J., Maria A., Blanco V.** — Fusion Engineering and Design, 2016, vol. 124, DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.03.051.
17. **Shcherbak A.N., Mirnov S.V. et al.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2018, vol. 44, № 11, pp. 861—869, DOI: 10.1134/S0367292118110094 (in Russian).
18. **Cherkez D.I.** Dissertation for scientific degree of the cand. of phys.-math. sciences. Moscow, 2018 (in Russian).
19. **Ananyev S.S., Spitsyn A.V., Kuteev B.V.** — Fusion Engineering and Design, 2019, (in press); <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.01.028>.

AUTHORS

Ananyev S.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Ananyev_SS@nrcki.ru

Dnestrovskij A.Yu. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Kukushkin A.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; ank755@gmail.com

Spitsyn A.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Spitsyn_AV@nrcki.ru

Kuteev B.V. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kuteev_BV@nrcki.ru

Received 12 March 2019

Revised 20 March 2019

Accepted 26 March 2019

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 2, pp. 5—21